



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 199 43 783 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁷:
H 02 K 55/00
H 02 K 3/00
H 01 F 6/06

②1 Aktenzeichen: 199 43 783.1
②2 Anmeldetag: 13. 9. 1999
④3 Offenlegungstag: 29. 3. 2001

DE 199 43 783 A 1

⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

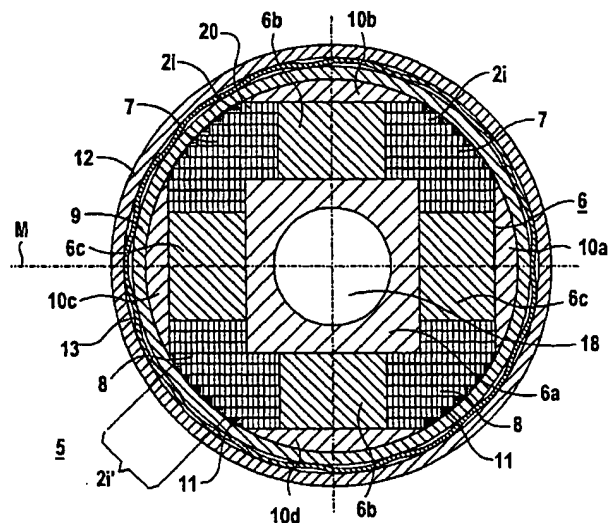
⑦2 Erfinder:
Ries, Günter, Dr., 91056 Erlangen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Supraleitungseinrichtung mit einer mehrpoligen Wicklungsanordnung

⑤7 Die Supraleitungseinrichtung (5) enthält eine 2- oder 4-polige Wicklungsanordnung mit einer an eine gemeinsame Zylindermantelfläche zumindest teilweise angepaßten Außenkontur. Es sind zwei zu einer Mittelebene (M) symmetrische Teilspulen (7, 8) aus einem Stapel von ebenen Rennbahntyp-Spulenelementen (2i) vorgesehen. Jedes Spulenelement ist aus bandförmigen Hoch-T_c-Supraleitern (20) erstellt.



DE 199 43 783 A 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Supraleitungseinrichtung mit einer Wicklungsanordnung, die mehrere, auf einem Wicklungsträger angeordnete Teilspulen enthält, welche

- jeweils aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen vom Rennbahntyp zusammengesetzt sind, wobei die Spulenelemente aus ein Hoch- T_c -Supraleitermaterial aufweisenden Leitern gewickelt sind,
- eine an eine gemeinsame Zylindermantelfläche zumindest teilweise angepaßte Außenkontur aufweisen und
- so zu erregen sind, daß ein mehrpoliges Magnetfeld erzeugt wird.

Eine entsprechende Supraleitungseinrichtung ist aus der WO 98/02953 A zu entnehmen.

Zwei- oder mehrpolige Elektromagnete weisen im allgemeinen vier oder eine noch größere Anzahl von gleichartigen magnetischen Einzelpolen auf, welche aus jeweils einer Polwicklung auf einem gegebenenfalls ferromagnetischen Wickelkern gebildet sind. Diese Wicklungen werden gleichmäßig auf dem Außenumfang eines entsprechenden Wicklungsträgers um eine gemeinsame Achse angeordnet und von Gleichstrom mit abwechselndem Stromumlaufsinne durchflossen. Bei den Wicklungen kann es sich um die von feststehenden Magneten oder insbesondere von Rotoren elektrischer Maschinen handeln.

Eine entsprechende elektrische Maschine mit einem solchen mehrpoligen Feldwicklungsaufbau ist der EP 0 805 545 A1 zu entnehmen. Jeder Einzelpol dieser Maschine ist durch eine Teilwicklung vom Rennbahntyp erzeugt, deren supraleitende Leiter um einen Eisenkern gewickelt sind und sich in einem eigenen Kryostaten befinden. Als Supraleitermaterial für die Leiter ist insbesondere Nb_3Sn vorgesehen.

Seit 1987 metalloxidische Supraleitermaterialien bekannt geworden sind, die Sprungtemperaturen von über 77 K aufweisen und die deshalb auch als Hoch- T_c -Supraleitermaterialien oder HTS-Materialien bezeichnet werden, versucht man, entsprechende Supraleitungseinrichtungen auch mit solchen Leitern zu erstellen. Es zeigt sich jedoch dabei, daß bisher bekannte Leiter nur eine verhältnismäßig geringe Stromtragfähigkeit in Magnetfeldern mit Induktionen im Tesla-Bereich besitzen. Dies macht es erforderlich, daß aus solchen Leitern erstellte Wicklungen trotz der verhältnismäßig hohen Sprungtemperaturen ihrer Leiter dennoch auf einem unterhalb von 77 K liegenden Temperaturniveau gehalten werden müssen.

Aus der eingangs genannten WO-Schrift ist ein Synchronmotor mit einem supraleitenden Läufer unter Verwendung entsprechender HTS-Leiter zu entnehmen. Dieser Läufer weist auf einem zylindrischen Wicklungsträger jeweils um 90° in Umfangsrichtung versetzt angeordnete Teilspulen auf, die die vier Einzelpole des Läufers bilden. Die Teilspulen sind dabei so gestaltet, daß ihre Außenkonturen an eine gemeinsame Zylindermantelfläche zumindest weitgehend angepaßt sind. Jede Teilspule besteht dabei aus einem Stapel von mehreren ebenen, mit HTS-Leitern erstellten Spulenelementen. Auf den Aufbau dieser Spulenelemente ist jedoch in der Schrift nicht näher eingegangen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die Supraleitungseinrichtung mit den eingangs genannten Merkmalen dahingehend auszugestalten, daß sie für eine entsprechende zwei- oder vierpolige Magnetfelderzeugung einen vereinfachten Aufbau ihrer Wicklungsanordnung aufweist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst,

daß zwei zu einer Mittelebene symmetrische Teilspulen aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen vom Rennbahntyp vorgesehen sind, wobei jedes Spulenelement aus bandförmigen Hoch- T_c -Supraleitern erstellt ist.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, daß sich bereits mit zwei entsprechenden Teilwicklungen jeweils aus dem besonderen Stapel auch mit bandförmigen HTS-Leitern die gewünschte Multipolanordnung mit einer für die meisten Anwendungsfälle hinreichenden Symmetrie erreichen läßt. Die Wicklungsanordnung der erfindungsgemäßen Supraleitungseinrichtung weist somit vorteilhaft einen entsprechend einfachen Aufbau auf.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Supraleitungseinrichtung gehen aus den abhängigen Ansprüchen hervor.

Vorteilhaft können Hoch- T_c -Supraleiter mit einem Aspektverhältnis von mindestens 3, vorzugsweise von mindestens 10 vorgesehen sein. Gerade derartige bandförmige Supraleiter lassen sich nämlich zu Rennbahn-Spulenelementen wickeln, ohne daß eine Degradation ihrer supraleitenden Eigenschaften zu befürchten ist.

Die Spulenelemente können vorteilhaft vorgefertigt sein, wobei die Wickel aus den bandförmigen Supraleitern vergossen werden können. Aus solchen Spulenelementen lassen sich dann bausteinartig die Teilspulen in einfacher Weise zusammensetzen.

Ferner ist es als besonders vorteilhaft anzusehen, wenn die Wicklungsanordnung die Rotorwicklung einer elektrischen Maschine ist. Eine zwei- oder vierpolige Anordnung, wie sie vielfach für solche Maschinen gefordert wird, läßt nämlich im Zentrum des Wicklungsträgers hinreichend Platz frei, der für Einbauten wie z. B. für Teile einer Kryoversorgung für die Supraleiter von einer Kopfseite der Wicklung her in ihrem Wicklungsträger genutzt werden kann. Vorteilhaft können deshalb dort Teile eines Kryokühlers angeordnet werden.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird nachfolgend auf die Zeichnung Bezug genommen, in der bevorzugte Ausführungsbeispiele von Supraleitungseinrichtungen nach der Erfindung oder von Teilen derselben schematisch veranschaulicht sind. Dabei zeigen die

Fig. 1 ein Spulenelement zum Aufbau einer Teilspule,

Fig. 2 eine Wicklungsanordnung,

Fig. 3 einen Quadranten einer weiteren Wicklungsanordnung,

Fig. 4 und 5 jeweils eine Supraleitungseinrichtung und Fig. 6 und 7 von verschiedenen Wicklungsanordnungen zu erzeugende Multipolfeldkonfigurationen.

In den Figuren sind sich entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

Eine erfindungsgemäße Supraleitungseinrichtung weist eine besonders gestaltete Wicklungsanordnung auf, die sich aus zwei Teilspulen zusammensetzt. Jede dieser Teilspulen soll dabei aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen aufgebaut sein. Ein entsprechendes Spulenelement zeigt Fig. 1 in Schrägansicht. Dieses mit 2 bezeichnete Spulenelement ist vom sogenannten Rennbahn(race track)-Typ; d. h., es besitzt gerade Seitenteile 3a und 3b, die über beispielsweise halbkreisförmige, stirnseitige Bogenteile 4a und 4b ineinander übergehen. Das Spulenelement soll mit mindestens einem bandförmigen Leiter aus einem der bekannten HTS-Materialien wie z. B. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ oder $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ aufgebaut sein. Hierbei kann es sich um Leiter mit auf einem bandförmigen, metallischen Träger wie z. B. aus einem Stahl oder aus mindestens einem anderen normalleitenden Metall wie Ag oder einer Ag-Legierung abgeschiedenem HTS-Material oder von einer normalleitenden Hülle oder Matrix wie z. B. aus Ag oder einer

Ag eingeschlossenen HTS-Mono- oder Multifilamenten handeln.

Entsprechende, an sich bekannte Leiter haben ein hohes Aspektverhältnis (= Leiterbreite/Leiterdicke) von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 10. Die HTS-Leiter sind insbesondere auf einem Temperaturniveau von höchstens 77 K (Siedetemperatur von LN_2), insbesondere aber darunter zu halten. Hierzu können an sich bekannte Kryokühler insbesondere vom Typ Pulsröhrenkühler oder Stirling oder Gifford-McMahon vorgesehen werden, mit denen sich die Leiter z. B. auf einem Temperaturniveau zwischen 20 und 50 K halten lassen.

Außerdem sollen die bandförmigen HTS-Leiter zu dem Spulenelement in ihrer "leichten Richtung", d. h. über ihre Breitseite gebogen sein. Auf diese Weise ist eine unzulässige Dehnung beim Biegen und eine damit verbundene Einbuße an Stromtragvermögen zu vermeiden. Beispielsweise sind folgende Parameter einzuhalten:

- Zulässiger Biegedurchmesser ≥ 50 mm
- Zulässiger axialer Zug beim Wickeln < 50 bis 100 MPa
- Zulässige Dehnung $< 0,3\%$
- Zulässige Druckkraft quer zum Leiter < 50 bis 100 MPa.

Entsprechende HTS-Leiter mit einem oder mehreren supraleitenden Leiterkernen (Mono- oder Multifilamentleiter), mit denen diese Parameter eingehalten werden können, sind allgemein bekannt. Dabei sind Leiter mit einer Hülle aus einer Silberlegierung wie AgMg oder AgPd hinsichtlich der Wickeltechnik unempfindlicher. Die Leiter können in dem Spulenelement 2 mittels einer an sich bekannten Vergußtechnik unter Verwendung eines aushärtbaren Kunststoffes fixiert sein.

Aus mehreren solcher vorzugsweise vorgefertigten Spulenelementen werden durch Stapelung zwei Teilspulen aufgebaut, die eine Wicklungsanordnung einer erfindungsgemäßen Supraleitungseinrichtung bilden. Eine solche Supraleitungseinrichtung zeigt Fig. 2 im Querschnitt. Diese allgemein mit 5 bezeichnete Supraleitungseinrichtung enthält einen insbesondere mehrteiligen Wicklungsträger 6, der zumindest teilweise aus ferromagnetischem Material bestehen kann. Beispielsweise umfaßt der Wicklungsträger einen zentralen Trägerkern 6a aus einem ferromagnetischen Material wie z. B. Eisen, während von zwei Teilspulen 7 und 8 umschlossene Mittelstücke 6b sowie Zwischenstücke 6c zwischen diesen Teilspulen wahlweise aus ferromagnetischem oder nicht-magnetischem Material bestehen.

Dieser Wicklungsträger nimmt die zwei Teilspulen 7 und 8 auf, die jeweils aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen 2i vom Rennbahntyp zusammengesetzt sind. Dabei sollen die Teilspulen symmetrisch zu einer Mittelebene M aufgebaut sein. Die Querausdehnungen ihrer einzelnen Spulenelemente in der Wickelebene sind so gewählt, daß zumindest einige dieser Spulenelemente seitlich an eine gemeinsame Zylindermantelfläche angrenzen. Die Spulenelemente haben deshalb im allgemeinen unterschiedliche Größe. Darüber hinaus weisen sie aus Feldformungsgründen im Bereich ihrer stirnseitigen Bogenteile auch unterschiedliche Ausdehnungen in Längsrichtung (= Richtung ihrer Seitenteile) auf.

An die gemeinsame Zylindermantelfläche ist somit die Außenkontur der jeweiligen Teilspule bzw. der gesamten Wicklungsanordnung zumindest teilweise angepaßt. Die entsprechenden, an die Zylindermantelfläche angrenzenden Spulenelemente sind mit 2i' bezeichnet. In der Figur sind ferner noch vier Kappen 10a bis 10d mit kreissegmentarti-

gem Querschnitt gezeigt, mit denen die Teilspulen 7 und 8 an dem Wicklungsträger 6 befestigt sind.

Die die Wicklungsanordnung und die Kappen 10a bis 10d umschließende Zylindermantelfläche wird beispielsweise durch ein Innenrohr 9 festgelegt. Innerhalb dieses gegebenenfalls durch ein besonderes Hüllrohr gebildeten Innenrohres können die von ihm eingeschlossenen Teile mittels eines aushärtbaren Kunststoffes 11 vergossen sein. Da das Innenrohr 9 im allgemeinen auf Tieftemperatur wie die von ihm umgebene Wicklungsanordnung aus den Teilspulen 7 und 8 liegt, kann es z. B. von einem Außenrohr 12 auf Raumtemperatur konzentrisch umschlossen sein, wobei der Zwischenraum zwischen Außen- und Innenrohr zu deren gegenseitiger thermischer Isolation mit Isolationsmitteln 13 wie z. B. Isolationsfolien und/oder Vakuum versehen ist.

Fig. 3 zeigt als Querschnitt einen Quadranten einer weiteren Supraleitungseinrichtung 14 nach der Erfindung mit einem Stapel von ebenen Rennbahntyp-Spulenelementen 2i bzw. 2i' einer Teilspule 7. Durch den Wicklungsträger 6 aus kaltem Eisen verlaufen Kühlkanäle 15 zu den Supraleitern der Teilspule 7. Der Wicklungsträger und die in ihm angeordnete Teilspule sind von einer Bandage 16 umschlossen, die dem kalten Hüllrohr nach Fig. 2 entspricht und somit eine Kryoinnenwand bildet.

Die Supraleitungseinrichtung nach der Erfindung kann z. B. eine elektrische Maschine wie beispielsweise eine Synchronmaschine mit einem Rotor sein, der eine besonders gestaltete Wicklungsanordnung aufweist. Eine entsprechende Ausführungsform ist in Fig. 4 in Schrägansicht angedeutet. Der dort mit 17 bezeichnete Rotor enthält einen Wicklungsträger 6 gemäß Fig. 2, von dem nur die längsseitigen Zwischenstücke 6c, ein Mittelstück 6b sowie die Kappen 10a bis 10c ersichtlich sind. Sein zentraler Trägerkern 6a weist einen Hohlraum 18 auf. Der Rotor ist um eine Achse A drehbar gelagert und von einer nicht dargestellten Ständerwicklung umgeben. Wegen der zweiteiligen Ausführungsform der Wicklungsanordnung bleibt vorteilhaft ein axialer Zugang zur Einführung von Teilen einer Kühlmittelzuführung oder zum Einbau von Teilen eines Kryokühlers in den Hohlraum 18. In der Figur ist ein Kaltkopf 19 eines entsprechenden Kryokühlers nur angedeutet.

Fig. 5 zeigt einen weiteren Rotor 21 einer erfindungsgemäßen Supraleitungseinrichtung in Fig. 4 entsprechender Darstellung. Bei diesem Rotor erstreckt sich ein zentraler Trägerkern 6d des Wicklungsträgers, der im wesentlichen dem Trägerkern 6a und den Zwischenstücken 6c nach Fig. 4 entspricht und somit einen rechteckigen Querschnitt hat, in axialer Richtung bis über den jeweiligen Kopf der Teilspulen 7 und 8 hinaus. Demgegenüber sind die von den Teilspulen eingeschlossenen Mittelstücke 6b des Wicklungsträgers von der Stirnseite des Trägerkerns 6d um eine Länge L in axialer Richtung nach innen beabstandet. Aus Feldformungsgründen sollte diese Länge L vorzugsweise 0,5 bis 2 mal so groß sein wie die Höhe h des Spulenelement-Stapels jeder Teilspule.

Die beiden Teilspulen einer Wicklungsanordnung einer erfindungsgemäßen Supraleitungseinrichtung können von einem elektrischen Strom so durchflossen werden, daß in ihren geraden Teilen eine Stromverteilung mit einer Symmetrie entsprechend einer 4-Polanordnung oder einer 2-Polanordnung entsteht. In den Fig. 6 und 7 sind die solche Polanordnungen hervorruhenden Stromflußrichtungen durch die hierfür bekannten Symbole \otimes und \odot veranschaulicht. Dabei sind die durch den Stromfluß erzeugten magnetischen Feldlinien der 4-Polanordnung nach Fig. 6 mit gepfeilten Linien f1 und die der 2-Polanordnung nach Fig. 7 mit gepfeilten Linien f2 veranschaulicht. D. h., erfindungsgemäß läßt sich mit einer nur zweigeteilten Wicklungsanordnung je

nach Stromflußrichtung eine der beiden Polanordnungen gewinnen.

Bei den vorstehend erläuterten Ausführungsbeispielen nach den Fig. 4 und 5 wurde davon ausgegangen, daß es sich bei der Supraleitungseinrichtung nach der Erfindung um eine elektrische Maschine mit einer rotierenden Erregerwicklung handeln soll. Selbstverständlich kann die Wicklungsanordnung einer entsprechenden Einrichtung auch Teil einer ortsfesten Magnetspule mit zwei oder vier magnetischen Polen (= sogenannter linearer Di- bzw. Quadrupol) sein.

Patentansprüche

1. Supraleitungseinrichtung mit einer Wicklungsanordnung, die mehrere, auf einem Wicklungsträger angeordnete Teilsulen enthält, welche
 - jeweils aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen vom Rennbahntyp zusammengesetzt sind, wobei die Spulenelemente aus ein Hoch- T_c -Supraleitermaterial aufweisenden Leitern gewickelt sind,
 - eine an eine gemeinsame Zylindermantelfläche zumindest teilweise angepaßte Außenkontur aufweisen und
 - so zu erregen sind, daß ein mehrpoliges Magnetfeld erzeugt wird,
 dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung eines zwei- oder vierpoligen Magnetfeldes zwei zu einer Mittelebene (M) symmetrische Teilsulen (7, 8) aus einem Stapel von ebenen Spulenelementen (2i) vom Rennbahntyp vorgesehen sind, wobei jedes Spulenelement aus bandförmigen Hoch- T_c -Supraleitern (20) erstellt ist.
2. Supraleitungseinrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Supraleiter (20) mit einem Aspektverhältnis von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 10.
3. Supraleitungseinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Supraleiter (20) in den Spulenelementen (2i) vergossen sind.
4. Supraleitungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch vorgefertigte, zu den Teilsulen (7, 8) zusammengesetzte Spulenelemente (2i).
5. Supraleitungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Wicklungsträger (6) aus zumindest teilweise ferromagnetischem Material.
6. Supraleitungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Wicklungsträger aus mehreren Teilen (6a bis 6c) zusammengesetzt ist.
7. Supraleitungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ihre Wicklungsanordnung die Rotorwicklung einer elektrischen Maschine ist.
8. Supraleitungseinrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Wicklungsträger (6) Teile (19) eines Kryokühlers angeordnet sind.
9. Supraleitungseinrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Hoch- T_c -Supraleiter (20) auf einem Temperaturniveau unter 77 K gehalten sind.

- Leerseite -

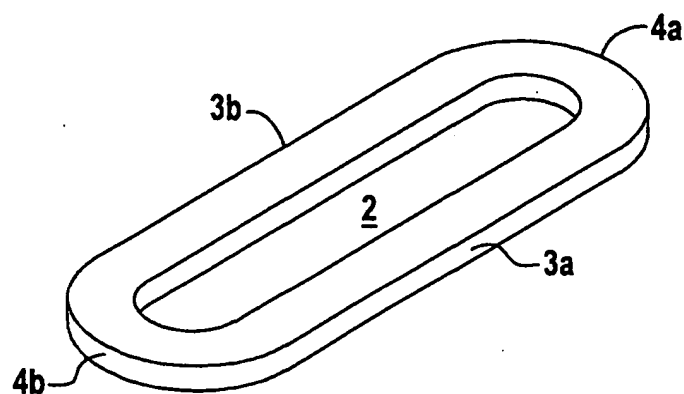


FIG 1

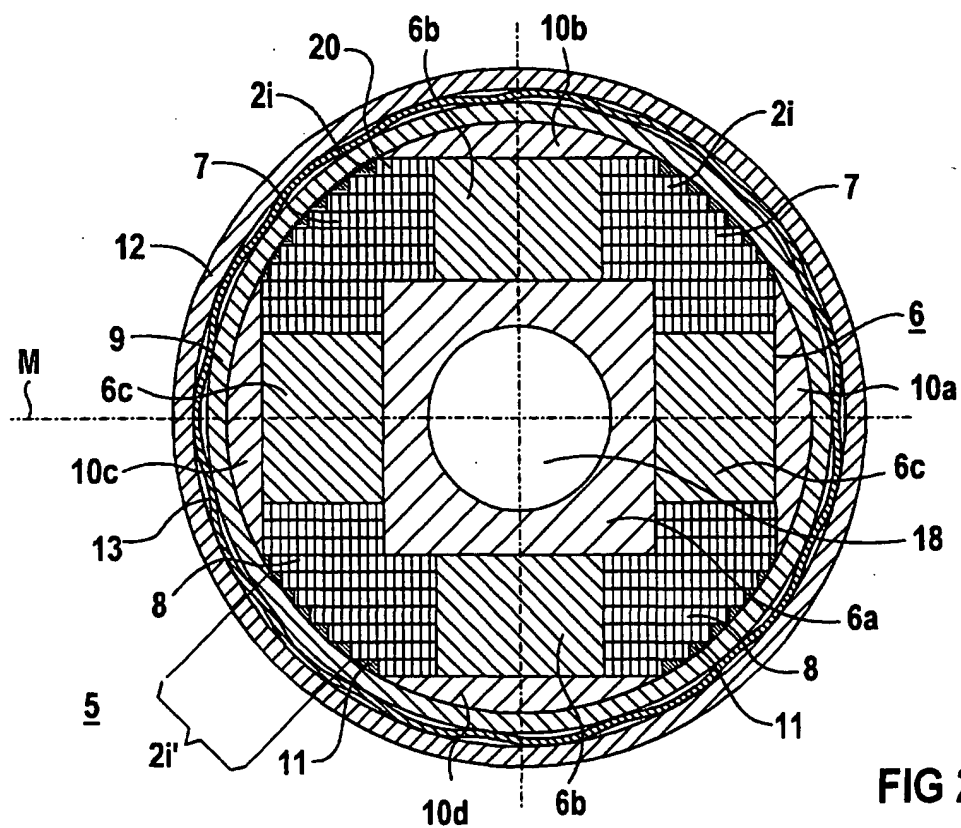


FIG 2

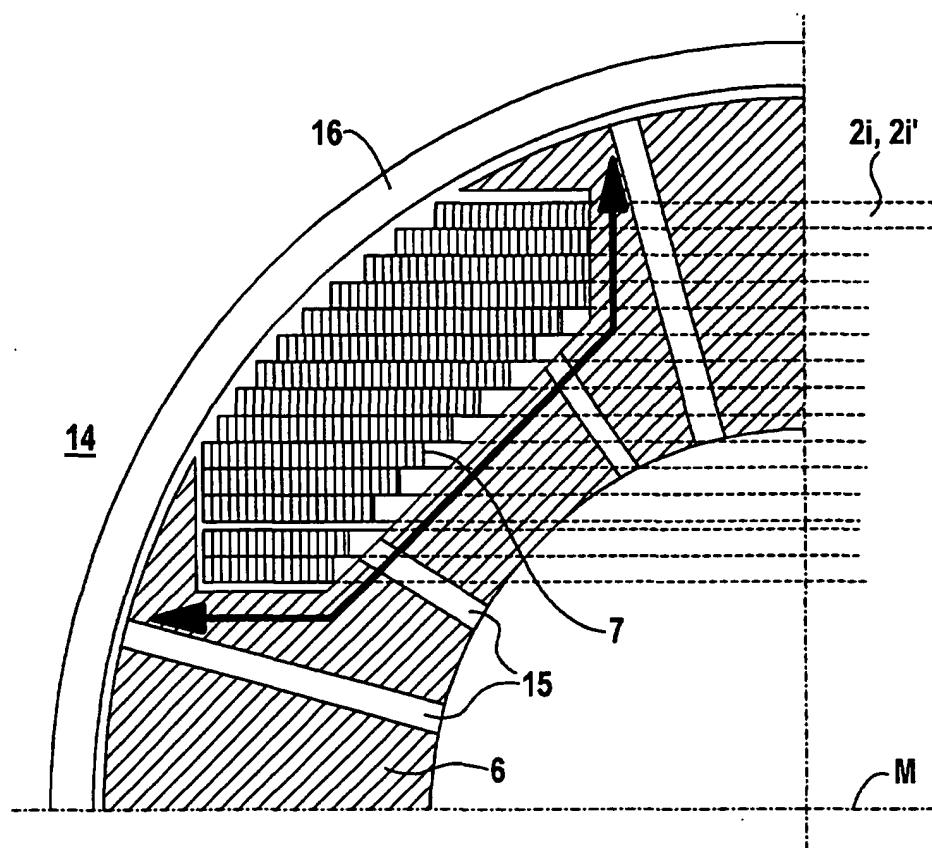


FIG 3

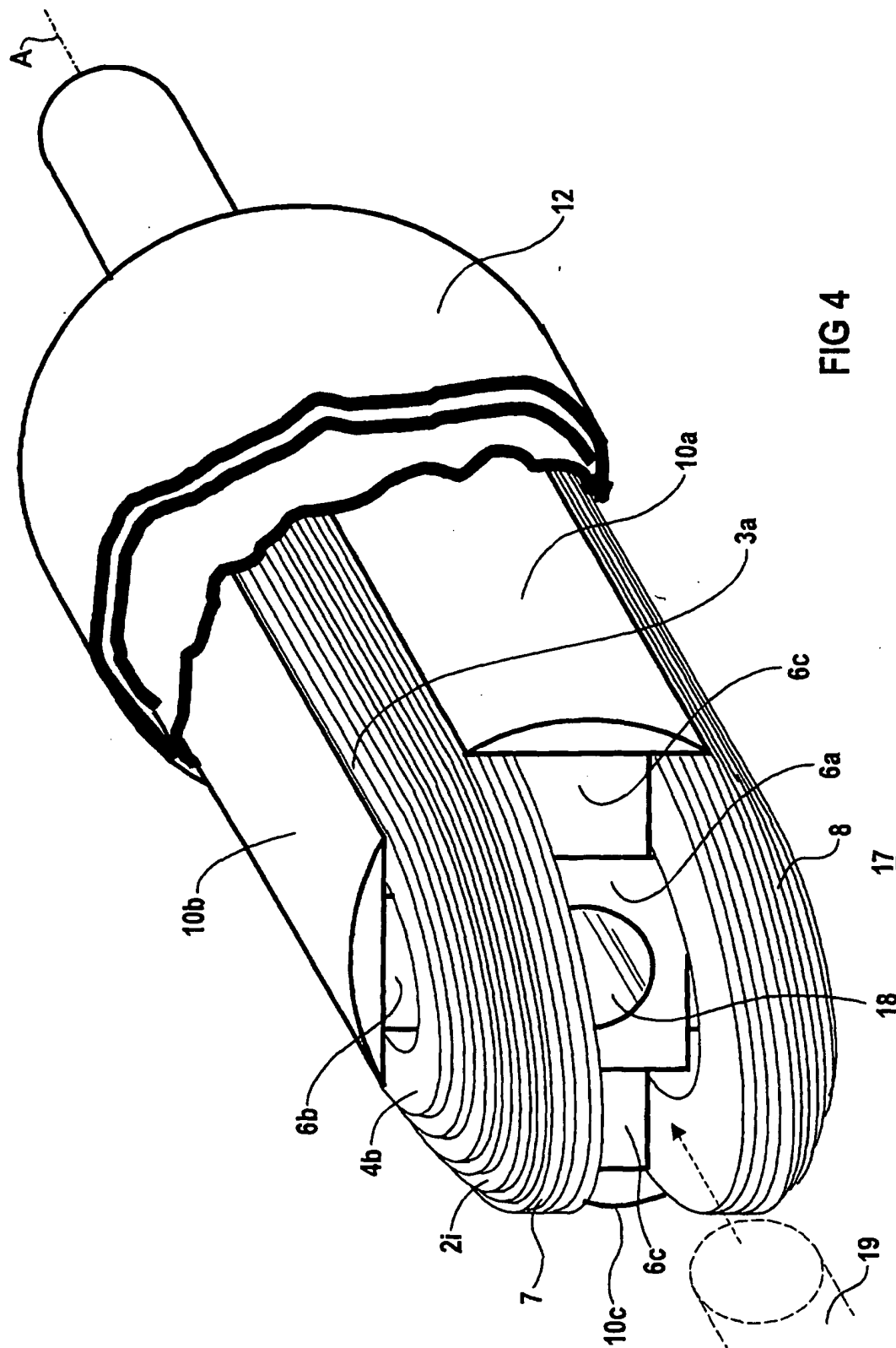


FIG 4

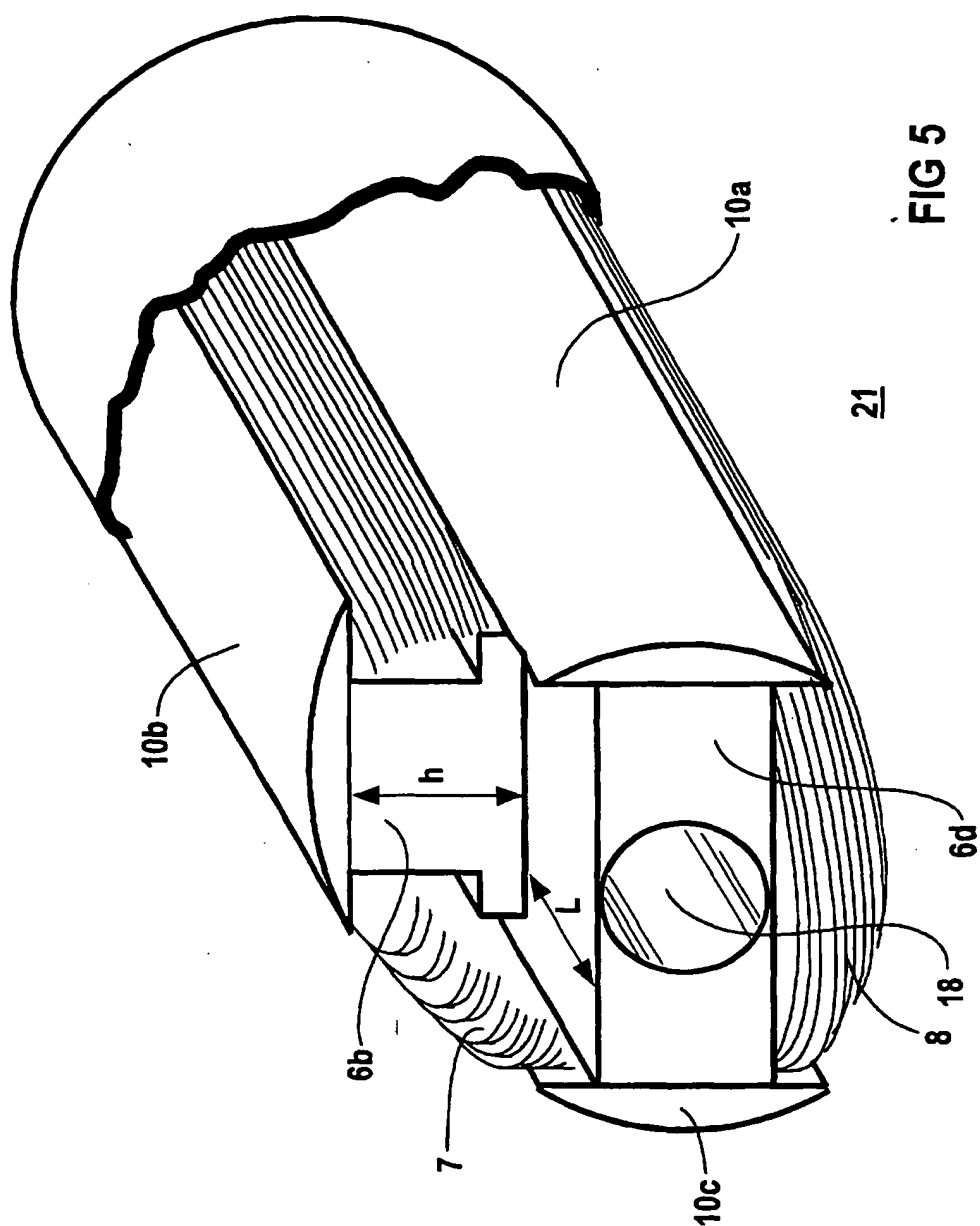


FIG 5

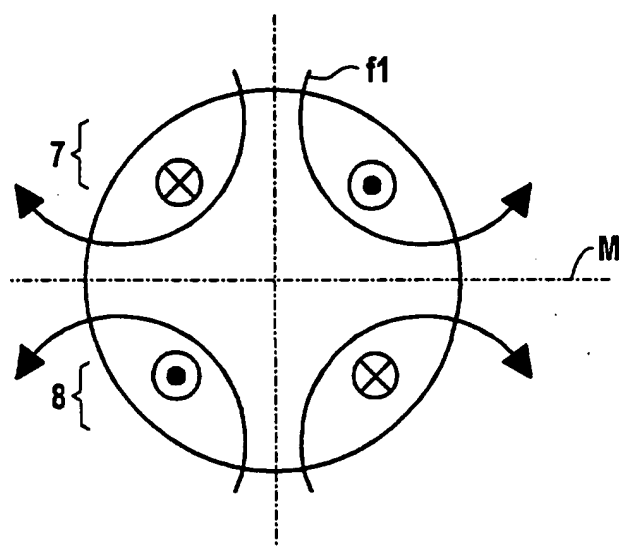


Fig. 6

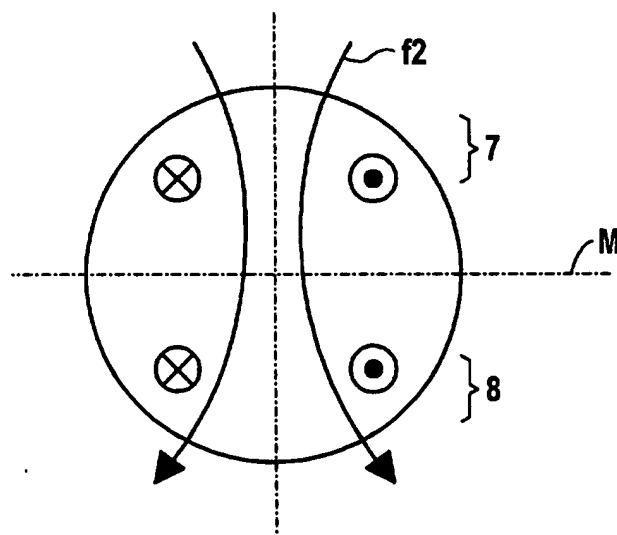


Fig. 7